

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт – Физико-технический  
Направление подготовки – Ядерные физика и технологии  
Кафедра – Прикладная физика

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ФАНТОМА SP34 ДЛЯ ОРТОВОЛЬНТОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</b>

УДК 539.16.08.616.-07

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АЗА	Тхорик Оксана Владимировна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник отдела мед.физики ОГАУЗ "ТООД"	Сухих Е.С.	к. ф.-м. н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Меньшикова Е.В.	к. ф. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ПФ	Гоголева Т.С.	к. ф.-м. н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПФ ФТИ ТПУ	Вагнер А.Р.	к. ф.-м. н.		

Томск – 2017 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Общекультурные компетенции</b>	
Р1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
Р2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
Р3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
Р4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
Р5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
Р6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
Р7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
	профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – Физико-технический  
 Направление подготовки – Ядерные физика и технологии  
 Кафедра – Прикладная физика

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой  
 \_\_\_\_\_ Вагнер А.Р.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0А3А	Тхорик Оксана Владимировна

Тема работы:

<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ФАНТОМА SP34 ДЛЯ ОРТОВОЛЬТОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	545 /с от 31.01.2017

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2017
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Техническая документация для рентгеновского аппарата Xstrahl 300, ионизационной камеры FC65-G. Физические параметры твердотельного фантома SP34, водного фантома BluePhantom.</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аналитический обзор литературы возможности использования твердотельного фантома SP34 для клинической дозиметрии.</li> <li>2. Рассмотрение методик определения поглощенной дозы в фантоме.</li> <li>3. Постановка актуальности, цели и задач исследования.</li> <li>4. Экспериментальное исследование и математическая обработка полученных результатов.</li> <li>5. Построение моделей переноса излучения для</li> </ol>

	рентгеновского аппарата Xstrahl 300. 6. Анализ полученных результатов. Сравнение экспериментальных результатов и результатов моделирования. Выводы.
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент и ресурсоэффективность	Меньшикова Екатерина Валентиновна
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	16.01.2017
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник отдела мед. физики ОГАУЗ "ТООД"	Сухих Евгения Сергеевна	к. ф.-м. н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3А	Тхорик Оксана Владимировна		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – Физико-технический  
 Направление подготовки – Ядерные физика и технологии  
 Кафедра – Прикладная физика  
 Период выполнения весенний семестр 2017 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа
---------------------

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2017
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.02.2017	Обзор литературных источников и технической литературы	10
30.03.2017	Экспериментальные измерения и обработка полученных данных	10
15.04.2017	Построение модели рентгеновского аппарата Xstrahl 300	10
13.05.2017	Обработка результатов. Сравнение результатов моделей и экспериментальных результатов. Выводы.	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник отдела мед.физики ОГАУЗ "ТООД"	Сухих Евгения Сергеевна	к. ф.-м. н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПФ ФТИ ТПУ	Вагнер Александр Рудольфович	к. ф.-м. н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А3А	Тхорик Оксана Владимировна

Институт	ФТ	Кафедра	ПФ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Радиационная безопасность человека и окружающей среды

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Затраты на спецоборудование 1 241 000 руб. Основная заработная плата исполнителей темы 55 441 руб. Дополнительная заработная плата исполнителей темы 5 544 руб. Отчисления во внебюджетные фонды 16 526руб. Накладные расходы 2 159 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Тариф на промышленную электроэнергию 5,8 за 1 кВт·ч Районный коэффициент города Томска -1,3
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Размер страховых взносов - 30%. Пониженная ставка - 27,1%.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Иерархическая структура работ
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Оценка конкурентоспособности технических решений Матрица SWOT График проведения и бюджет НИ Диаграмма Ганта

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	21.03.2017
---	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф.менеджмента	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3А	Тхорик Оксана Владимировна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А3А	Тхорик Оксана Владимировна

Институт	ФТИ	Кафедра	ПФ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Радиационная безопасность человека и окружающей среды

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных факторов производственной среды: повышенный уровень электромагнитных полей, отклонение показателей микроклимата от оптимальных, ионизирующее излучение, шум, вибрация.</li> <li>– опасных факторов производственной среды: вероятность возникновения пожара, вероятность поражения электрическим током.</li> </ul>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожарная безопасность;</li> <li>– требования к охране труда по работе с ПЭВМ;</li> <li>– радиационная безопасность.</li> </ul>

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10.04.2017
--	------------

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3А	Тхорик Оксана Владимировна		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 78 с., 17 рис., 26 табл., 16 источников, 3 прил.

Ключевые слова: твердотельный фантом SP34; водный фантом; поправочный коэффициент пересчета; тканеэквивалентный фантом.

Объектом исследования является твердотельный тканеэквивалентный фантом SP34.

Цель работы – исследование возможности использования твердотельного тканеэквивалентного фантома SP34 для ортовольтового рентгеновского излучения.

В процессе исследования проводились измерение поглощенной дозы в водном и твердотельном фантомах на рентгеновском аппарате, компьютерное моделирование экспериментас фантомами, произведен расчет финансовой составляющей работы, описаны факторы, влиявшие на выполнение работы.

В результате исследования были проведены расчеты поправочного коэффициента пересчета на основе экспериментальных данных и на основе эксперимента, проведено сравнение полученных коэффициентов пересчета, оценена финансовая составляющая работа и описаны внешние факторы, которые влияли на работу.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: твердотельный тканеэквивалентный фантом SP34, состоящий из пластин, которые включают в свой состав полистирол с примесью  $TiO_2$  около 2%, предназначенный для измерения фотонных пусков с диапазоном энергий от 1,25 до 10 МэВ.

Степень внедрения: высокая, проект может использоваться в настоящее время и при продолжении дальнейших исследований.

Область применения: медицинская физика.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

## Оглавление

Введение.....	14
1. Аналитический обзор литературы .....	15
1.1 Определение поглощенной дозы в воде для фотонных пучков средних энергий .....	15
1.1.1 Поправочные коэффициенты для получения скорректированного значения заряда .....	16
1.1.2 Калибровочный коэффициент для ионизационной камеры....	17
1.2 Фантомы для дозиметрии фотонных пучков .....	18
1.2.1 Измерение поглощенной дозы для пучков фотонов средних энергий в фантоме.....	19
1.3 Цилиндрическая ионизационная камера FC65-G.....	20
1.4 Рентгеновский аппарат Xstrahl 300 .....	21
1.5 Клинический дозиметр DOSE-1 .....	23
1.6 Анализатор дозового поля Blue Phantom .....	24
1.7 Твердотельный тканеэквивалентный фантом SP34 .....	26
1.8 Программа "Компьютерная лаборатория" .....	28
2. Экспериментальные исследования .....	29
2.1 Расчет поправочного коэффициента пересчета на основании эксперимента .....	29
2.2 Расчет поправочного коэффициента пересчета на основании моделирования.....	33
2.3 Сравнение поправочных коэффициентов пересчета, полученных различными способами.....	37

3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	40
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	41
3.2 Анализ конкурентных технических решений.....	42
3.3 SWOT-анализ.....	44
3.4 Планирование ВКР .....	46
3.4.1 Структура работ в рамках ВКР.....	47
3.4.2 Определение трудоемкости выполнения ВКР .....	48
3.4.3 Разработка графика проведения ВКР .....	49
3.4.4 Расчет затрат на специальное оборудование для научных .....	51
(экспериментальных) работ .....	51
3.4.5 Основная заработная плата исполнителей.....	52
3.4.6 Дополнительная заработная плата .....	54
3.4.7 Отчисления во внебюджетные фонды.....	54
3.4.8 Накладные расходы .....	55
3.4.9 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского .....	56
проекта.....	56
3.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, .....	56
бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	56
4. Социальная ответственность.....	59
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	60
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней .....	61
опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на ПК и .....	61
источниками ИИ.....	61
4.2.1 Организационные мероприятия .....	62

4.2.2 Технические мероприятия .....	62
4.2.3 Условия безопасной работы .....	64
4.2.4 Радиационная безопасность.....	67
4.2.4.1 Работа с закрытыми источниками ионизирующего излучения. ....	68
4.2.4.2 Работа с источниками рентгеновского излучения .....	71
4.3 Электробезопасность.....	72
4.4 Пожарная безопасность.....	73
Заключение .....	76
Выводы.....	76
Список используемой литературы .....	77
Приложение А .....	79
Приложение Б.....	80
Приложение В .....	81

## Введение

В настоящее время широко используются два вида тканеэквивалентных фантомов: твердотельный и водный. Вода является «золотым стандартом» согласно рекомендациям МАГАТЭ в качестве среды для измерений поглощенной дозы, как для фотонных, так и для электронных пучков, поскольку вода обладает максимально схожими с человеческими тканями характеристиками.

Однако, с практической точки зрения, водный фантом является не удобным в применении, поскольку требует большого времени подготовки к работе. Одним из главных недостатков этого фантома является его большой вес. Помимо собственного веса в (45 кг) в бак наливается вода, общим объемом около 200 л. Следствием этого является следующая проблема использования водного фантома - проблема транспортировки. Эта проблема особенно остро встает, когда есть необходимость проверки работы сразу нескольких установок, находящихся в разных помещениях. В добавок ко всему оборудование, имеющееся в арсенале Томского областного онкологического диспансера нуждается в ежеквартальной проверке.

Выходом в таком случае является использование твердотельного фантома SP34. Данный фантом состоит из набора пластин разных толщин. Он имеет небольшие размеры, легкий вес, следовательно, удобен при транспортировке. Однако данный фантом можно использовать для фотонных пучков в диапазоне энергий от 1,25 до 10 МэВ. Для применения данного фантома совместно с рентгенотерапевтическим аппаратом Xstrahl 300, расположенном на базе Томского областного онкологического диспансера, необходимо провести дополнительные исследования о поведении данного фантома в ортовольтном рентгеновском диапазоне энергий.

# 1. Аналитический обзор литературы

## 1.1 Определение поглощенной дозы в воде для фотонных пучков средних энергий

Согласно международному дозиметрическому протоколу TRS-398 [1] вычисление поглощённой дозы в воде  $D_{w,Q}$  осуществляется на основе измерений с помощью ионизационной камеры, соответствующей исследуемому пучку, и определяется следующим образом:

$$D_{w,Q} = M * N_{D,W}^Q, \quad (1)$$

где  $M$  – скорректированное значение заряда, измеренное в точке на глубине  $d_{max}$  ( $d_{max}$  – глубина в фантоме, на которой расположен максимум дозного распределения), Кл;

$N_{D,W}^Q$  – калибровочный коэффициент для ионизационной камеры, использованной в измерениях, в случае, если клинические условия, при которых проводилась дозиметрия, отличаются от стандартных лабораторных условий, при которых калибровалась данная ионизационная камера, отн. ед.

Скорректированное значение заряда, измеренного ионизационной камерой, рассчитывается следующим образом:

$$M = M_{raw} * P_{TP} * P_{ion} * P_{pol} * P_{ecel}, \quad (2)$$

где  $M_{raw}$  – исходное значение заряда, измеренное ионизационной камерой, Кл;

$P_{TP}$  – поправка на температуру среды и давление воздуха в момент измерений, отн. ед.;

$P_{ion}$  – поправка на рекомбинацию, которая учитывает неполную эффективность сбора ионов в камере в процессе измерения, отн. ед.;

$P_{pol}$  – поправка на эффект полярности напряжения на электродах камеры, отн. ед.;

$P_{ecel}$  – калибровочный коэффициент электрометра, отн. ед.

Далее рассмотрим данные поправочные коэффициенты более детально.

### 1.1.1 Поправочные коэффициенты для получения скорректированного значения заряда

1.  $P_{TP}$  – поправочный коэффициент, который учитывает разницу между стандартными температурой и давлением в поверочной лаборатории и температурой и давлением при измерениях конечным пользователем и влияние этой разницы на показания ионизационной камеры.

$$P_{TP} = \frac{273,2 + T}{273,2 + 22,0} * \frac{101,33}{P}, \quad (3)$$

где  $T$  – текущая температура, измеренная в градусах Цельсия возле ионизационной камеры;

$P$  - текущее атмосферное давление, кПа.

2.  $P_{ion}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние на показания ионизационной камеры отсутствия полного сбора заряда из-за рекомбинации ионов. Для импульсных пучков формула примет следующий вид:

$$P_{ion}(V_H) = \frac{1 - \frac{V_H}{V_L}}{\frac{M_{raw}^H - \frac{V_H}{V_L}}{\frac{M_{raw}^L}{V_L}}}, \quad (4)$$

где  $V_H$  – нормальное (номинальное) рабочее напряжение на детекторе (обычно оно является большим из используемых напряжений), кВ;

$M_{raw}^H$  – значение заряда, измеренного ионизационной камерой, при напряжении  $V_H$ , Кл;

$V_L$  – напряжение, равное, как правило, половине нормального рабочего напряжения, кВ;

$M_{raw}^L$  – значение заряда, измеренного ионизационной камерой, при напряжении  $V_L$ , Кл.

3.  $P_{pol}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние изменения полярности напряжения, приложенного к электродам камеры, который определяется следующим образом:

$$P_{pol} = \left| \frac{M_{raw}^+ - M_{raw}^-}{2 * M_{raw}} \right|, \quad (5)$$

где  $M_{raw}^+$  – показания ионизационной камеры при напряжении положительной полярности;

$M_{raw}^-$  – показания ионизационной камеры при напряжении отрицательной полярности;

$M_{raw}$  – показания ионизационной камеры при напряжении основного режима работы (либо  $M_{raw}^+$ , либо  $M_{raw}^-$ ).

4.  $P_{e cel}$  – калибровочный коэффициент электрметра, который равен единице при условии, что камера и электрметр калибровались вместе.

### 1.1.2 Калибровочный коэффициент для ионизационной камеры

Калибровочный коэффициент  $N_{D,W}^Q$ , учитывающий отличие реальных условий измерения от лабораторных условий калибровки, может быть выражен как:

$$N_{D,W}^Q = k_Q * N_{D,W}^{Co^{60}}, \quad (6)$$

где  $N_{D,W}^{Co^{60}}$  – калибровочный коэффициент в единицах поглощённой дозы в воде для опорного вида излучения, который указывается в паспорте камеры производителем, Гр/Кл;

$k_Q$  – коэффициент качества, поправочный коэффициент, учитывающий качество пучка, т.е. отличие измеряемого пучка излучения относительно опорного пучка [1]. В данном случае слово «отличие» подразумевает различия в ионизации и потерях энергии используемым пучком в интересующей точке в среде, вызванные различием спектрального состава и геометрической формы поля опорного излучения и используемого излучения. Следует также отметить, что качество одного и того же пучка будет отличаться для ионизационных камер различных типов. Для пучка  $^{60}Co$  по определению  $k_Q = 1$ .

Определение величины коэффициента  $k_Q$ , которая зависит от типа ионизационной камеры и от параметров исследуемого пучка, представляет главную сложность при проведении клинической дозиметрии.

Для измерения дозиметрических характеристик радиационного поля используют две геометрии: геометрия расстояние источник-поверхность (РИП) и геометрия расстояние источник – ось (т.е. центр вращения аппарата) (РИО). Схематическое изображение обеих геометрий показано на рисунке 1. В случае использования геометрии РИП, размер поля облучения определяется на поверхности фантома, а в случае РИО, размер поля определяется на глубине измерения. Таким образом, размер поля облучения в точке измерения будет больше для РИП, чем для РИО [1].

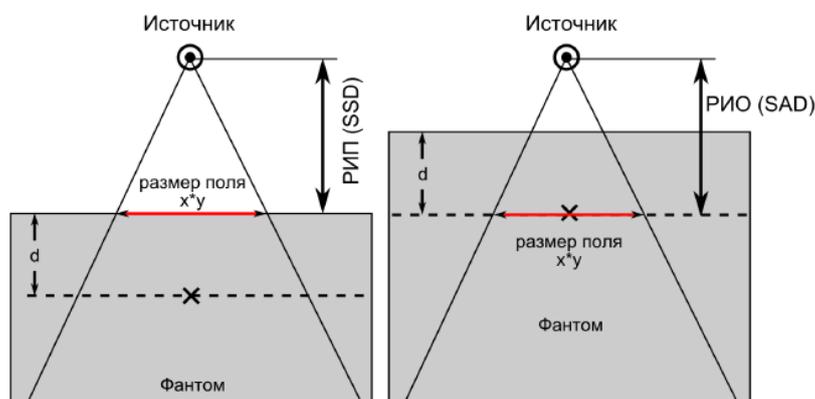


Рисунок 1— Определение геометрий РИП и РИО [1]

## 1.2 Фантомы для дозиметрии фотонных пучков

При использовании полистирола для фотонной дозиметрии высоких энергий геометрия калибровки пучка должна быть скорректирована таким образом, чтобы флюенс фотонов в дозиметре был таким же, как и на опорной глубине в водном фантоме. Также требуются дополнительные поправки, когда используется водозащитный колпачок для ионизационной камеры в водном фантоме. В использовании того или иного материал фантома есть свои преимущества и недостатки. Например, вода является рефернсной средой для калибровки пучков, и здесь не требуются какие-либо поправочные

коэффициенты для определения поглощённой дозы в воде. Однако, дозиметрические измерения, проводимые в водном фантоме, весьма времязатратны, и порой бывает не совсем удобно или возможно провести измерения в водной среде по сравнению с пластиковым фантомом (требуются водозащитные колпачки, существуют сложности в точной оценки положения камеры, особенно когда нужно провести измерения на глубине нескольких мм и т.д.).

### 1.2.1 Измерение поглощенной дозы для пучков фотонов средних энергий в фантоме

При дозиметрических измерениях для фотонных пучков средних энергий в качестве референтной среды выступает вода. Для рутинных измерений качества пучка удобнее использовать пластиковые фантомы. Также пластиковые фантомы удобнее при верификации плана для интенсивно модулированной лучевой терапии, потому что позволяют легче и быстрее выставить точную геометрию.

В случае, когда спектральное распределение и флюенс первичных и рассеянных фотонов в точке измерения в пластиковом фантоме те же самые, как и в сравниваемой точке в водном фантоме, доза в воде даётся выражением:

$$D_{water} = D_{med} * \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{med}^w, \quad (7)$$

где  $\left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{med}^w$  – отношение усреднённых массовых энергетических коэффициентов поглощения для воды и для материала фантома.

Для идеальных условий (точечный источник первичных фотонов, в фантоме происходит только комптоновское взаимодействие, и полностью отсутствуют фотоны, которые рассеиваются от коллиматора или других компонентов головки аппарата), наблюдается одинаковое спектральное распределение в пластике и в воде при постоянном РИП и размере коллиматора, а также при правильном масштабировании глубины измерения

детектора в зависимости от относительной электронной концентрации в пластике и в воде. При этих условиях, доза в воде связана с дозой в пластике следующим выражением:

$$D_{water} = D_{med} * \left( \frac{\mu_{en}^-}{\rho} \right)_{med}^w * (SSD^2)_{med}^w, \quad (8)$$

где  $(SSD^2)_{med}^w$  – отношение квадратов расстояния источник-детектор для пластикового фантома и для водного фантома [1].

Для реальных (клинических) условий коллиматоры и другие компоненты головки аппарата оказывают значительное влияние на количество рассеянных фотонов относительно первичного пучка, поэтому закон обратных квадратов уже не способен правильно описать флюенс как функцию расстояния от источника. По этим причинам рекомендуется, чтобы РИП и размер поля коллиматора для пластикового и водного фантоме были одинаковы, и вышележащая толщина пластика была масштабирована таким образом, чтобы ослабление падающего пучка в пластике соответствовало ослаблению пучка в воде.

Равное ослабление падающего пучка наблюдается, когда толщина пластин связана с толщиной воды масштабным коэффициентом SF, определенным следующим образом:

$$SF = \frac{d_{med}}{d_{water}} = \frac{\Sigma_w^-}{\Sigma_{med}^-}, \quad (9)$$

где  $\Sigma_i^-$  – средний линейный коэффициент ослабления, вычисленный для спектра падающих фотонов. Числовые значения масштабного коэффициента SF для фотонов тормозного излучения с номинальным ускоряющим потенциалом до 50 МэВ [1].

### 1.3 Цилиндрическая ионизационная камера FC65-G

Ионизационная камера FC65-G (рисунок 2) – цилиндрическая ионизационная камера, предназначенная для абсолютной и относительной

дозиметрии фотонных и электронных пучков в радиотерапии. Измерения могут проводиться в воздухе, водных фантомах и твердотельных фантомах.



Рисунок 2 – Ионизационная камера FC65-G [2]

Камера предназначена для энергетического диапазона фотонов и электронов в медицинских ускорителях. Также камера может быть использована для измерения дозы в рентгеновских лучах с энергией от 70 до 280кэВ и для гамма-квантов цезия-137 и кобальта-60. Энергетический диапазон протонных пучков от 50 до 250 МэВ.

Характеристики:

- Водонепроницаемая, вентилируемая;
- Чувствительный объем: 0,65 см<sup>3</sup>;
- Толщина стенки: 0,073 г/см<sup>3</sup>;
- Диаметр: 7 мм [2].

#### **1.4 Рентгеновский аппарат Xstrahl 300**

Рентгеновский аппарат Xstrahl 300 (рисунок 3) – мощное рентгенотерапевтическое устройство предназначенное для лечения доброкачественных и злокачественных опухолей с помощью направленного рентгеновского излучения. В аппарате Xstrahl 300 используется металлокерамическая рентгеновская трубка медицинского назначения на 300 кВ. Излучатель содержит двухполюсную металлокерамическую рентгеновскую трубку со встроенными высоковольтными разъемами и

системой охлаждения. Он располагается в рентгенозащитном кожухе с фитингами для подсоединения масляных шлангов.



Рисунок 3 – Рентгенотерапевтический аппарат Xstrahl 300 [3]

Рентгеновская система управления Xstrahl 300 состоит из управляемого ПК интерфейса с рентгеновской панелью управления и пульта управления TP2. Система может работать как в режиме контроля по времени, так и в режиме контроля по дозе. В обоих случаях она оборудована двумя микропроцессорными структурами для поддержки независимого таймера обратного отсчета для обеспечения безопасности.

Предельные рабочие характеристики рентгеновской трубки:

- Напряжение: от 60 до 300 кВ;
- Ток: от 0 до 30 мА;
- Мощность: от 400 до 3200 Вт для установленной стабильности.

Характеристики рентгеновской трубки:

- Размер фокального: пятна 8 мм (наибольший размер);
- Материал мишени: вольфрам;
- Собственная фильтрация:  $2 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм Be}$ ;
- Постоянная мощность трубки максимум: 3200 Вт;
- Максимальные постоянные характеристики: 320 кВп/10,0 мА;
- Общее покрытие поля:  $40^\circ$ ;
- Анодный угол:  $30^\circ$ ;

- Вес: 41 кг.

Рентгеновский излучатель Xstrahl 300 может монтироваться как на потолочной подвеске, так и на напольной колонне. Каждый вариант разработан для обеспечения точного позиционирования с минимальными усилиями оператора [3].

### 1.5 Клинический дозиметр DOSE-1

Дозиметр клинический Dose-1 (Рисунок 4) предназначен для измерений поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы в воде высокоэнергетических фотонных и электронных пучков, гамма – и рентгеновского излучений, а также амбиентного эквивалента дозы и мощности амбиентного эквивалента дозы фотонного излучения (МЭД). Дозиметр может применяться в лучевой терапии, а также для дозиметрии при диагностике в медицине и в целях радиационной защиты. Измерения могут проводиться в твердотельных и водных фантомах, а также в воздухе.



Рисунок 4 – клинический дозиметр DOSE-1 [4]

Принцип действия дозиметра основан на измерении силы электрического тока или заряда образующихся в блоках детектирования – ионизационных камерах под воздействием ионизирующих излучений.

Конструктивно дозиметр состоит из электрометра и ионизационных камер. Измерение электрических величин и преобразование их в дозиметрические осуществляется с помощью электрометра. Связь между ионизационными камерами и электрометром осуществляется с помощью триаксиального кабеля. Возможно также подключение полупроводниковых и алмазных детекторов.

Основные характеристики электрометра:

- вывод на экран всех измеряемых величин, коэффициентов ионизационных камер и поправочных коэффициентов;
- одновременное измерение и вывод на экран значений дозы, мощности дозы, средней мощности дозы, заряда и тока;
- Большой высококонтрастный графический EL дисплей с широким углом обзора (160 градусов);
- сохраняет в памяти (библиотеках) до 40 наборов специальных данных о датчиках, а также о поправочных коэффициентах для ионизационных камер и контрольных радиоактивных источников;
- имеет встроенный источник самотестирования: тесты токовых утечек и поляризационного напряжения для обеспечения максимальной надежности как электрометра, так и датчика;
- использует источник питания широкого диапазона с автоматической адаптацией к напряжению сети;
- имеет возможность работы от альтернативного источника питания (аккумуляторы, батареи) [4].

## **1.6 Анализатор дозового поля Blue Phantom**

Анализатор дозного поля Blue Phantom (рисунок 5) предназначен для целей клинической дозиметрии, основное назначение которой – обеспечить

выполнение главной задачи лучевой терапии онкологических заболеваний, а именно подведение заданной дозы к выбранной врачом мишени (опухоли) с высокой точностью при минимальном поражении здоровых органов и тканей. С помощью анализатора дозного поля определяется пространственное распределение дозного поля в поглощающей среде – воде, близкой по своим характеристикам к тканям тела человека, при разных режимах работы облучательного аппарата. Полученные результаты используются затем в качестве исходных данных для планирования сеансов облучения пациентов. Анализатор дозового поля Blue Phantom и его комплектующие – средство измерения и анализа поля излучения медицинских линейных ускорителей, составная часть системы OmniPro-Асcept. Система состоит из трехмерного сервомеханизма (резервуар Blue Phantom с механическими деталями), блока управления с двухканальным электрометром (центрального блока управления) и двух отдельных детекторов (камер ионизации) [5].



Рисунок 5– Анализатор дозового поля Blue Phantom [5]

Водный фантом – прямоугольный бак с водой, внутри которого находится подвижный механизм для трехмерного сканирования, т.е. перемещения детектора излучения в пределах измеряемого объема в режимах непрерывного и пошагового сканирования.

Основные характеристики водного фантома:

- внешние габариты водного бака: 675x645x560 мм;
- диапазон сканирования: 478x478x410 мм;
- приблизительный объем: 200 л;
- вес (без воды): 45 кг;
- материал стенок: плексиглас;
- толщина стенок: 15 мм;
- точность определения местоположения:  $\pm 0,1$  мм [6].

Управление механизмом осуществляется специализированным блоком управления с двухканальным электрометром, через соединительный кабель управления. Также управление перемещениями камеры может осуществляться с ручного пульта управления. Регулировка уровня сканирующего механизма может производиться независимо от уровня фантома. Имеются индикаторы положений датчика по различным направлениям сканирования и индикатор уровня. Возможно осуществление сканирования в непрерывном и дискретном (пошаговом) режиме [6].

### **1.7 Твердотельный тканеэквивалентный фантом SP34**

Фантом SP34 (рисунок 6) представляет собой твердотельный водоеквивалентный фантом состоящий из пластин, предназначенных для контроля качества абсолютных и относительных измерений дозы фотонных и электронных пучков с камерой фермеровского типа, плоскопараллельных или компактных камер. Фантом представляет собой набор из одной пластины толщиной 1 мм, двух пластин по 2 мм, одной пластины 5 мм и двадцати девяти пластин толщиной 10 мм.

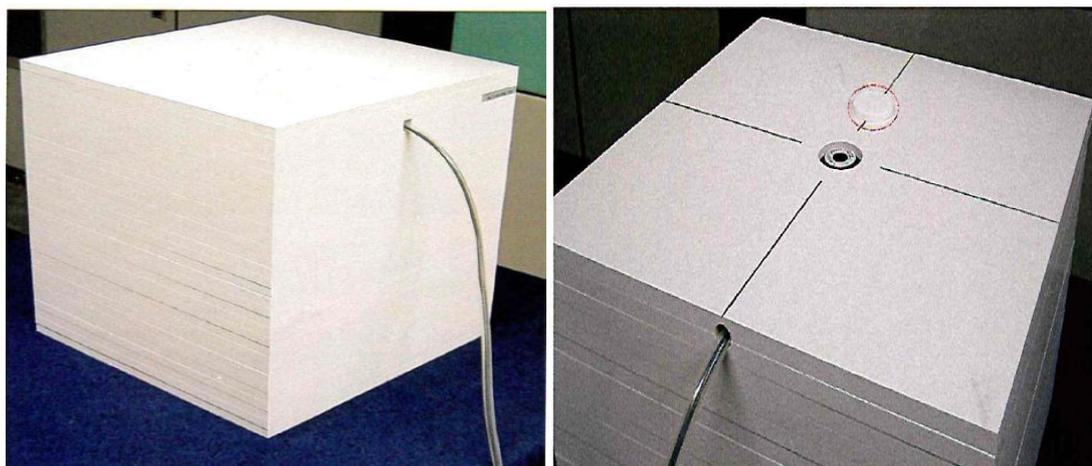


Рисунок 6— тканеэквивалентный твердотельный фантом SP34 [7]

Основные технические характеристики твердотельного тканеэквивалентного фантома SP34 представлены в таблице 1 [7].

Таблица 1—Технические характеристики фантома SP34 [7]

Материал:	Водо-эквивалентный полистирол «RW3»
Диапазон энергий:	Фононы: $^{60}\text{Co}$ – 25 МэВ Электроны: 4–25 МэВ
Состав:	Полистирол ( $\text{C}_8\text{H}_8$ ) содержащий примесь $2,1\% \pm 0,2\% \text{TiO}_2$ .
Плотность:	$1,045 \text{ г/см}^3$
Отношение $(Z/A)_F$ :	0,536
Электронная плотность, $(e^-/\text{гр})$ :	$3,386 \times 10^{23}$
Концентрация электронов, $(e^-/\text{см}^3)$ :	$3,539 \times 10^{23}$
Размеры пластины: Толщина:	$300 \times 300 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ 1 мм $\pm 0,05 \text{ мм}$ 2 мм $\pm 0,05 \text{ мм}$ 5 мм $\pm 0,05 \text{ мм}$ 10 мм $\pm 0,05 \text{ мм}$
Толщина пластины адаптера:	$20 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$

Твердотельный фантом SP34 – водозэквивалентный материал RW3 представляет собой белый полистирол, содержащий 2,1% оксида титана ( $\text{TiO}_2$ ). Абсорбционная способность RW3 очень близка к абсорбционной способности природной воды [8].

Полистирол – термопластичный материал, обладающий высокой твёрдостью и хорошими диэлектрическими свойствами, химически стойкий по отношению к щелочам и кислотам, кроме азотной и уксусной. Полистирол не растворяется в низших спиртах, алифатических углеводородах, фенолах,

простых эфирах. Растворяется в собственном мономере, ароматических и хлорированных углеводородах, сложных эфирах, ацетоне. Устойчив к радиоактивному облучению, но стойкость к ультрафиолетовым лучам невелика. Полистирол легко формуется и окрашивается. Хорошо обрабатывается механическими способами. Без труда склеивается. Обладает низким влагопоглощением и высокой влагостойкостью и морозостойкостью. Физиологически безвреден. Плотность полистирола составляет от 1050 до 1080 кг/м<sup>3</sup> (в то время как плотность воды составляет 1000 кг/м<sup>3</sup>) [8].

### **1.8 Программа "Компьютерная лаборатория"**

Программа «Компьютерная лаборатория» (КЛ) предназначена для моделирования методом Монте-Карло процессов распространения электронов, позитронов, фотонов и протонов в веществе, визуализации этих процессов распространения на экране дисплея и получения численных результатов взаимодействия (например, альбедо, коэффициентов пропускания частиц, энергетических и угловых распределений частиц, распределений поглощенной энергии в веществе, дозы за защитой и т. д.).

Основные задачи, которые можно решить с помощью КЛ, следующие:

- показать наглядно физические процессы, которые происходят при попадании ионизирующего излучения в вещество;
- дополнить реальный физический эксперимент (например, лабораторную работу) более разнообразными начальными данными источника, поглотителя и детектора, чтобы в результате исследований получить не просто число, а физическую закономерность;
- предоставить возможность проведения численных экспериментов для ряда задач, когда реальный физический эксперимент

невозможен из-за отсутствия необходимого лабораторного оборудования [9].

## **2. Экспериментальные исследования**

В данной работе рассматривается получение поправочного коэффициента пересчета, с помощью которого можно определить эффективность использования твердотельного фантома SP34 для ортовольтового рентгеновского излучения.

На сегодняшний день существует два метода получения поправочных коэффициентов пересчета: экспериментальным путем и на основе моделирования.

В экспериментальном способе поправочный коэффициент находится через отношение измеренной поглощенной дозы в воде к измеренной поглощенной дозы в твердотельном фантоме SP34 (данная формула получена при преобразовании формулы 7). Данные вычисления проводятся для каждого напряжения трубки и для всех имеющихся размеров полей.

При расчете поправочного коэффициента пересчета на основе моделирования используется аналогичная расчетная формула, что и в первом способе, однако, поглощенная доза в водном и твердотельном фантомах определяется в результате моделирования в программе КЛ. Моделирование проводилось в отсутствие ионизационной камеры в фантоме, как возмущающего фактора флюенса пучка. Вычисления производятся для всех напряжений и для всех размеров полей.

### **2.1 Расчет поправочного коэффициента пересчета на основании эксперимента**

В данной работе проводились измерения поглощенной дозы в водном и твердотельном фантомах от рентгенотерапевтического аппарата Xstrahl 300.

Экспериментальная установка состоит из источника излучения (в качестве которого выступает рентгенотерапевтический аппарат Xstrahl 300), детектора (в роли которого выступает ионизационная камера FC65-G совместно с клиническим дозиметром DOSE-1) и тканезквивалентного фантома (в качестве фантома в данном эксперименте выступают анализатор дозного поля Blue Phantom и твердотельный фантом SP34).

В ходе данной работы изначально проводились измерения поглощенной дозы, с использованием водного фантома. На рисунке 7 представлена схема экспериментальной установки. Источник помещается на расстоянии 50 см от фантома. На рентгеновскую трубку подается напряжения в диапазоне от 100 до 300 кВ. К трубке крепятся аппликаторы, которые задают различные размеры полей (в зависимости от эксперимента). Сгенерированное трубкой излучение падает на фантом (который расположен перпендикулярно пучку рентгеновского излучения). Излучение, прошедшее через слой воды регистрируется детектором, расположенном на глубине 2 см в фантоме. Дозиметр DOSE-1 анализировал полученные данные, и на цифровом табло появлялось значение заряда, измеренное ионизационной камерой FC65-G.

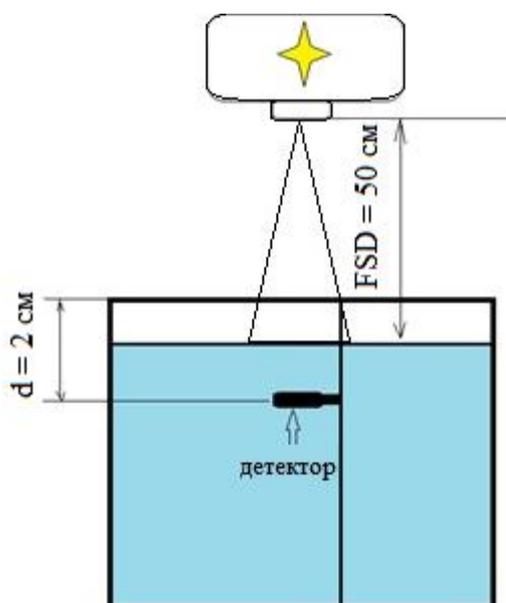


Рисунок 7 – Схема эксперимента с использованием водного фантома

В результате получаем набор значений заряда, измеренных ионизационной камерой, полученный при напряжениях на трубке 100 кВ, 120

кВ, 150 кВ, 180 кВ, 200 кВ, 250 кВ, 300 кВ и размерах полей 4x4 см<sup>2</sup>, 6x6 см<sup>2</sup>, 8x8 см<sup>2</sup>, 10x10 см<sup>2</sup>, 15x15 см<sup>2</sup>, 20x20 см<sup>2</sup>. Полученные значения зарядов представлены в приложении А. Умножая полученное значение заряда на соответствующий калибровочный коэффициент для ионизационной камеры FC65-GN<sub>D,w</sub> = 4,828 \* 10<sup>7</sup>Гр/Кл получим значение поглощенной дозы в этой точке. Результаты пересчитанных поглощенных доз в эксперименте с водным фантомом представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты эксперимента с водным фантомом

Напряжение, кэВ	Поглощенная доза в воде, Гр					
	Размеры поля, см <sup>2</sup>					
	4x4	6x6	8x8	10x10	15x15	20x20
<b>100</b>	0,80	0,90	0,89	0,94	1,03	1,06
<b>120</b>	0,79	0,90	0,92	0,97	1,07	1,12
<b>150</b>	0,78	0,89	0,92	0,98	1,09	1,16
<b>180</b>	0,78	0,88	0,93	1,00	1,11	1,17
<b>200</b>	0,77	0,91	0,93	1,01	1,13	1,20
<b>250</b>	0,78	0,91	0,94	1,02	1,14	1,21
<b>300</b>	0,79	0,92	0,92	1,01	1,13	1,20

Далее проводился идентичный эксперимент с использованием твердотельного фантома SP34. На рисунке 8 представлена схема данного эксперимента. Поскольку фантом SP34 имеет отличную от воды плотность, необходимо пересчитать глубину на которую помещается детектор. Перечет производится по формуле (9) где масштабный коэффициент для данного эксперимента равен  $SF = 1,045$ . Тогда

$$d_{SP34} = \frac{d_{water}}{SF} = \frac{2}{1,045} = 1,8 \text{ см.}$$

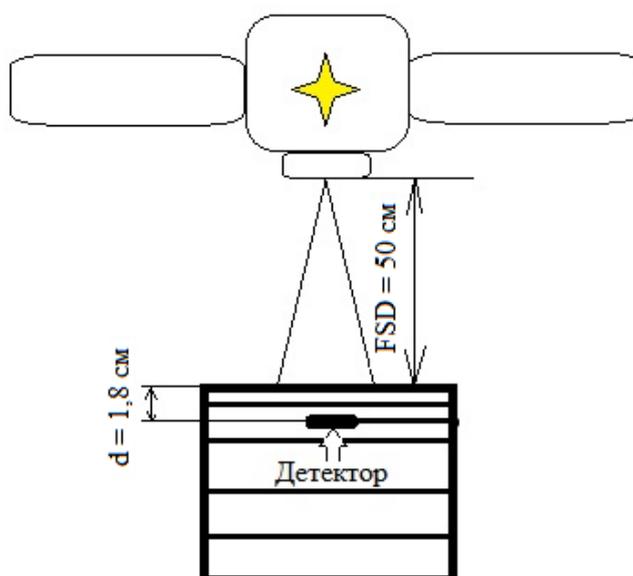


Рисунок 8 – Схема эксперимента с использованием твердотельного фантома SP34

Из схемы эксперимента видно, что расстояние от источника до поверхности осталось таким же, как и в эксперименте с водным фантомом. В результате эксперимента получили значения зарядов, которые меняются, в зависимости от подаваемых напряжений на трубку и размеров полей. Значения измеренных зарядов представлены в приложении Б. Умножая полученное значение заряда на соответствующий калибровочный коэффициент для ионизационной камеры FC65-G  $N_{D,w} = 4,828 \cdot 10^7$  Гр/Кл получим значение поглощенной дозы в этой точке. Результаты пересчитанных поглощенных доз в эксперименте с твердотельным фантомом SP34 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты эксперимента с твердотельным фантомом SP34

Напряжение, кВ	Поглощенная доза в фантоме SP34, Гр					
	Размеры поля, см <sup>2</sup>					
	4x4	6x6	8x8	10x10	15x15	20x20
100	0,66	0,81	0,90	0,95	1,03	1,06
120	0,65	0,80	0,89	0,95	1,04	1,07
150	0,65	0,80	0,89	0,94	1,03	1,08
180	0,66	0,79	0,89	0,95	1,04	1,09
200	0,65	0,79	0,88	0,94	1,04	1,08
250	0,67	0,80	0,89	0,95	1,04	1,09
300	0,68	0,80	0,89	0,95	1,03	1,08

На основании полученных в ходе эксперимента данных можно провести расчет поправочного коэффициента пересчета, используя формулу, полученную на основе формулы (7):

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{med}^w = \frac{D_{water}}{D_{SP34}}, \quad (10)$$

Рассчитанные значения поправочных коэффициентов пересчета приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Зависимость значения поправочных коэффициентов пересчета от напряжения трубки и размеров поля

Напряжение, кэВ	Поправочный коэффициент пересчета					
	Размеры поля, см <sup>2</sup>					
	4x4	6x6	8x8	10x10	15x15	20x20
<b>100</b>	1,20	1,11	0,99	0,99	1,00	1,00
<b>120</b>	1,21	1,12	1,03	1,03	1,04	1,04
<b>150</b>	1,20	1,12	1,04	1,04	1,06	1,07
<b>180</b>	1,19	1,11	1,05	1,05	1,07	1,08
<b>200</b>	1,19	1,16	1,06	1,07	1,09	1,10
<b>250</b>	1,17	1,15	1,06	1,07	1,10	1,11
<b>300</b>	1,17	1,15	1,04	1,07	1,09	1,11

Из таблицы 4 видно, что поправочный коэффициент пересчета зависит от размеров полей и напряжения, подаваемого на трубку.

## 2.2 Расчет поправочного коэффициента пересчета на основании моделирования

Следующим этапом работы является моделирование экспериментов, прописанных в предыдущем разделе.

Прежде чем начать основное моделирование эксперимента в программе КЛ в режиме «FLUX», необходимо было провести некоторые подготовительные работы.

Для начала, в программе КЛ, в режиме «CONST» был создан файл констант. Данный файл учитывает состав и плотности материалов, используемых при моделировании. Данный файл включает в себя не только стандартный состав воздуха, воды и плексигласа (уже прописанные в программе КЛ), но и состав фантома SP34 с учетом примесей из оксида титана.

Далее необходимо смоделировать спектр рентгеновской трубки, чтобы корректно смоделировать источник излучения. Для этого использовалась программа КЛ в режиме «BREMSSTRAHLUNG». Для этого был создан исходный файл данных, который учитывал, что рентгеновское излучение получается в результате торможения электронов о вольфрамовую мишень, которая расположена под углом 30 градусов относительно первичного пучка. После чего полученное излучение проходит сквозь алюминиевые и медные фильтры (в зависимости от напряжения, подаваемого на трубку),. Данные фильтры предназначены для выравнивания энергетического спектра и получения относительно равномерного по энергии пучка рентгеновского излучения. В конечном итоге получаем файл результатов, из которого необходимо взять данные для спектра рентгеновской трубки.

Далее переходим к моделированию эксперимента в режиме «FLUX». В исходном файле учитываем, что толщина воздушного столба оставляет 50см. Полученный спектр рентгеновской трубки задаем при моделировании источника излучения. При моделировании эксперимента с водным фантомом задаем три слоя: воздух (50 см), вода (50 см) и плексиглас (1,5 см). Полученная модель представлена на рисунке 9. Красными линиями изображены траектории движения фотонов.

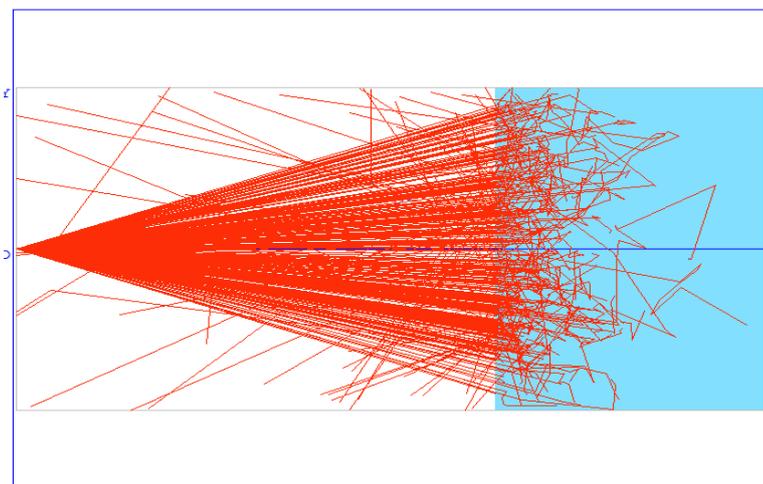


Рисунок 9 – Модель эксперимента с использованием водного фантома

В результате моделирования, для получения достоверных данных для каждого напряжения на трубке и для каждого размера поля создавался свой исходный файл. Из каждого файла результатов были взяты значения поглощенной дозы фотонов на глубине 2 см (т.е. на расстоянии 52 см от источника). Результаты поглощенной дозы в воде, полученной в результате моделирования представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты моделирования эксперимента с использованием водного фантома

Напряжение, кэВ	Поглощенная доза в воде, Гр					
	Размеры поля, см <sup>2</sup>					
	4x4	6x6	8x8	10x10	15x15	20x20
<b>100</b>	0,79	0,89	0,88	0,93	1,03	1,06
<b>120</b>	0,78	0,88	0,90	0,96	1,06	1,11
<b>150</b>	0,80	0,91	0,94	1,00	1,09	1,16
<b>180</b>	0,78	0,86	0,92	0,99	1,11	1,16
<b>200</b>	0,79	0,92	0,92	1,03	1,13	1,19
<b>250</b>	0,78	0,91	0,94	1,03	1,14	1,20
<b>300</b>	0,80	0,91	0,93	0,99	1,13	1,21

Аналогичное моделирование проводилось и для твердотельного фантома SP34. При моделировании в исходном файле задавалось два слоя: слой воздуха (50 см) и слой фантома SP34 (30 см). Из каждого файла результатов были взяты значения поглощенной дозы фотонов на глубине 1,8 см (т.е. на

расстоянии 51,8 см от источника). Полученная модель представлена на рисунке 10.

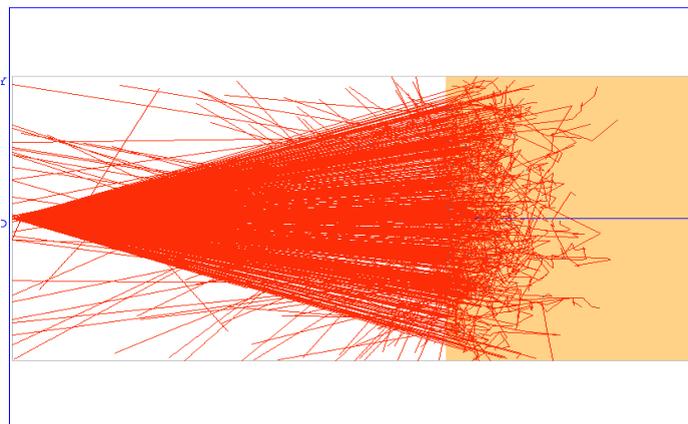


Рисунок 10 – Модель эксперимента с использованием твердотельного фантома SP34

В данной модели, как и в предыдущей красными линиями изображены траектории движения фотонов. В результате моделирования, для получения достоверных данных для каждого напряжения на трубке и для каждого размера поля создавался свой исходный файл. Из каждого файла результатов были взяты значения поглощенной дозы фотонов на глубине 1,8 см (т.е. на расстоянии 51,8 см от источника). Результаты поглощенной дозы в фантоме SP34, полученной в результате моделирования представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты моделирования в твердотельном фантоме SP34 с использованием рентгеновской трубки

Напряжение, кэВ	Поглощенная доза в фантоме SP34, Гр					
	Размеры поля, см <sup>2</sup>					
	4x4	6x6	8x8	10x10	15x15	20x20
<b>100</b>	0,67	0,82	0,91	0,96	1,03	1,06
<b>120</b>	0,66	0,81	0,90	0,96	1,04	1,07
<b>150</b>	0,66	0,82	0,91	0,94	1,03	1,08
<b>180</b>	0,67	0,79	0,90	0,95	1,04	1,09
<b>200</b>	0,66	0,80	0,89	0,95	1,04	1,08
<b>250</b>	0,68	0,81	0,91	0,97	1,05	1,08
<b>300</b>	0,70	0,81	0,91	0,95	1,03	1,09

На основании полученных данных можно провести расчет поправочных коэффициентов пересчета, используя формулу (10). Результаты вычисления приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Поправочный коэффициент пересчета, полученный в результате моделирования

Напряжение, кэВ	Поправочные коэффициенты пересчета					
	Размеры поля, см <sup>2</sup>					
	4x4	6x6	8x8	10x10	15x15	20x20
100	1,18	1,09	0,97	0,97	1,00	1,00
120	1,18	1,09	1,00	1,00	1,02	1,04
150	1,21	1,11	1,03	1,06	1,06	1,07
180	1,16	1,09	1,02	1,04	1,07	1,06
200	1,20	1,15	1,03	1,08	1,09	1,10
250	1,15	1,12	1,03	1,06	1,09	1,11
300	1,14	1,12	1,02	1,04	1,10	1,11

### 2.3 Сравнение поправочных коэффициентов пересчета, полученных различными способами

В ходе данной работы были рассчитаны поправочные коэффициенты пересчета из воды в материал твердотельного фантома SP34. Погрешность, рассчитанная для поправочных коэффициентов для рентгеновской трубки, представлена в таблице 8.

Таблица 8– Результат сравнения поправочных коэффициентов пересчета, полученных различными способами для рентгеновской трубки

Напряжение, кэВ	Погрешность методов получения поправочного коэффициента пересчета, %					
	Размеры поля, см <sup>2</sup>					
	4x4	6x6	8x8	10x10	15x15	20x20
100	1,9	2,0	2,6	2,4	0,1	0,0
120	2,3	2,7	2,8	2,7	1,8	0,5
150	1,4	0,6	0,7	2,2	0,2	0,0
180	2,2	1,9	2,8	1,0	0,3	1,5

200	1,0	0,9	2,6	1,2	0,5	0,0
250	2,4	2,3	2,8	1,2	1,0	0,1
300	2,3	2,0	1,7	2,4	0,5	0,1

Для большей наглядности на рисунках 11 – 16 приведены сравнительные диаграммы отклонения одного метода от другого. На данных диаграммах выделен допустимый коридор погрешности в 3 %.

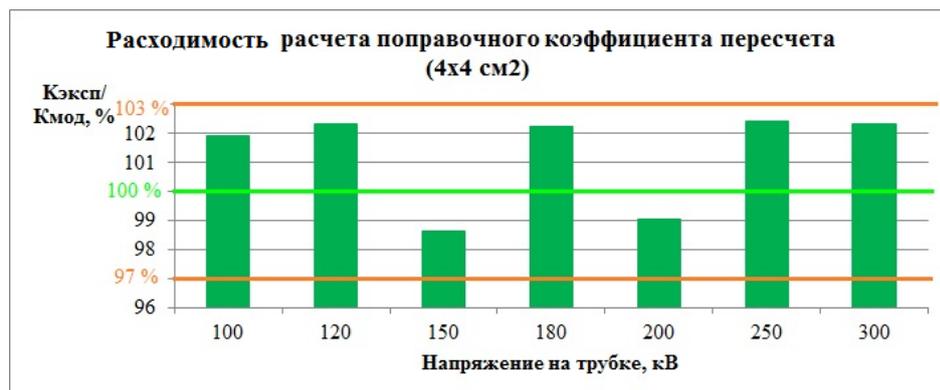


Рисунок 11 – Расходимость расчета поправочного коэффициента пересчета для всех напряжений на трубке для размера поля 4x4 см<sup>2</sup>

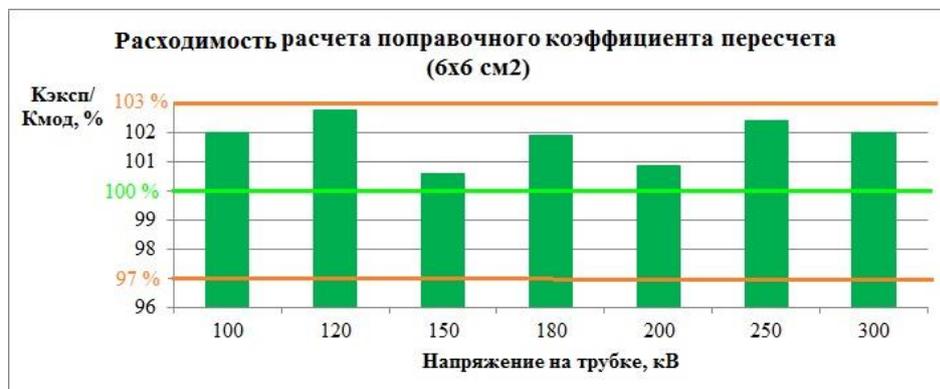


Рисунок 12 – Расходимость расчета поправочного коэффициента пересчета для всех напряжений на трубке для размера поля 6x6 см<sup>2</sup>

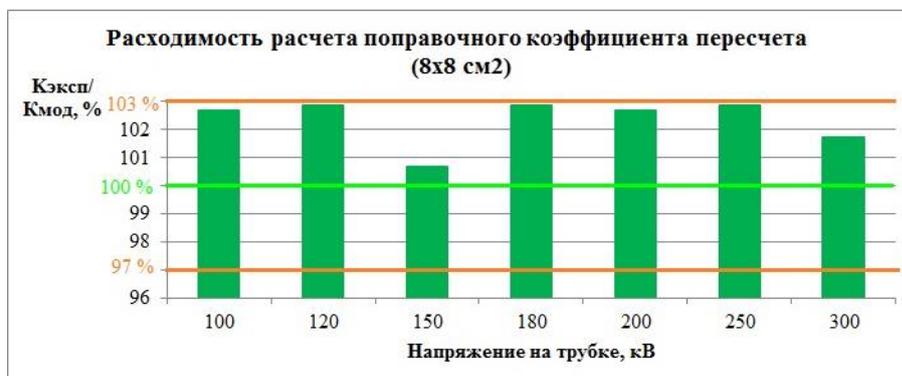


Рисунок 13 – Расходимость расчета поправочного коэффициента пересчета для всех напряжений на трубке для размера поля 8x8 см<sup>2</sup>



Рисунок 14 – Расходимость расчета поправочного коэффициента пересчета для всех напряжений на трубке для размера поля 10x10 см<sup>2</sup>

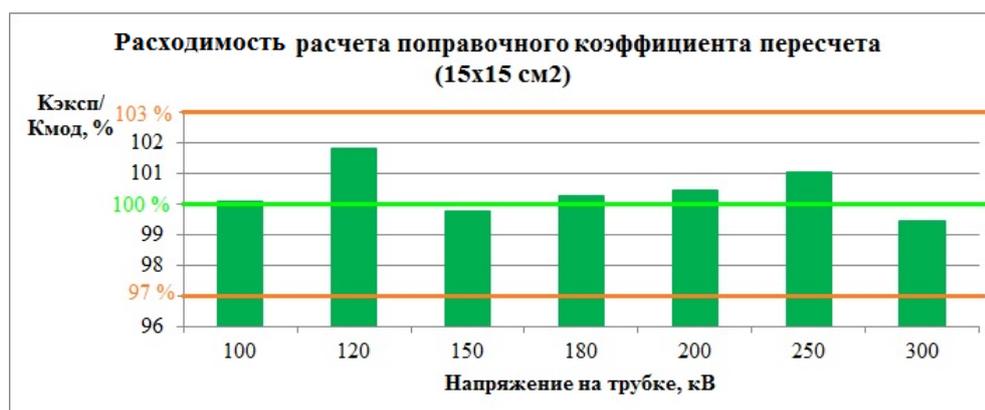


Рисунок 15 – Расходимость расчета поправочного коэффициента пересчета для всех напряжений на трубке для размера поля 15x15 см<sup>2</sup>

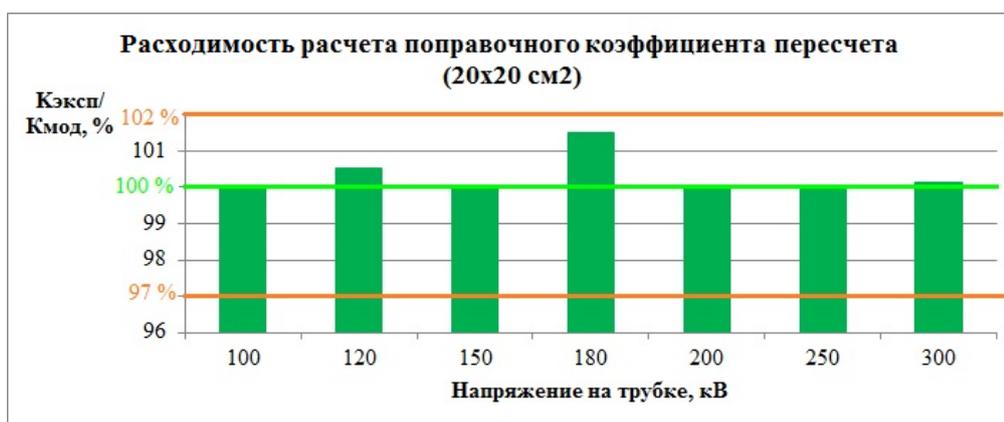


Рисунок 16 – Расходимость расчета поправочного коэффициента пересчета для всех напряжений на трубке для размера поля 20x20 см<sup>2</sup>

Анализируя полученные данные видно, что результаты вычислений поправочных коэффициентов пересчета, полученных экспериментальным путем и на основании моделирования, отличаются меньше чем на 3 %. На основании этого можно сделать вывод о том, что использование твердотельного фантома, совместно с данным коэффициентом пересчета, является приемлемым в ортовольтном рентгеновском диапазоне энергий.

### 3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

На сегодняшний день перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Коммерческая привлекательность научного исследования определяется как превышением технических параметров над предыдущими разработками, так и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на вопросы— будет ли продукт востребован рынком; какова будет его цена; каков бюджет научного проекта; какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательских работ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования [10].

### **3.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

В данной работе проводилось исследование возможности использования твердотельного тканезквивалентного фантома SP34. Были проведены измерения и моделирование в водном и твердотельном фантомах. На данном этапе говорить о коммерческом потенциале данного исследования рано. В связи с этим анализ потенциальных потребителей результатов сделан не был. Использование этого фантома может быть выгодно организациям, которые занимаются частыми исследованиями поведения пучков электронов или фотонов. В качестве заинтересованных могут быть организации, сфера деятельности которых затрагивают следующие области:

- при проведении радиационного контроля в рентгеновских кабинетах;

- при проведении приемочных и периодических испытаний рентгенодиагностического оборудования, для проверки безопасности и производительности оборудования, предназначенного для медицинских радиологических исследований.;
- при тестировании нового оборудования с целью исключения негативного воздействия радиации на организм человека;
- для измерения вертикально или горизонтально направленного излучения и для калибровки ионизационных камер.

Самое главное преимущество использования данного фантома перед водным фантомом состоит в экономии времени при подготовке к эксперименту. Дополнительно появится возможность проводить измерения в ортовольтном рентгеновском диапазоне энергий.

### 3.2 Анализ конкурентных технических решений

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта, приведенная в таблице 9. В качестве конкурирующей разработки был принят водный фантом (К1). Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять единицу.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (11)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Из данного анализа можно судить о явном преимуществе использования твердотельного фантома SP34.

Таблица 9 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>кл</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>кл</sub>
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
1.Повышение производительности труда пользователя	0,22	5	3	1,1	0,66
2.Помехоустойчивость	0,1	4	5	0,4	0,5
3.Качество интеллектуального интерфейса	0,01	3	4	0,03	0,04
4. Надежность	0,1	4	4	0,4	0,4
5. Потребность в ресурсах памяти	0,01	5	3	0,05	0,03
6.Простота эксплуатации	0,12	5	3	0,6	0,36
7. Удобство в эксплуатации	0,22	5	3	1,1	0,66
8. Функциональная мощность	0,1	5	5	0,5	0,5
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>					
1.Конкурентоспособность продукта	0,05	5	5	0,25	0,25
2.Уровень проникновения на рынок	0,01	5	5	0,05	0,05
3.Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	5	0,25	0,25
4. Цена	0,01	5	4	0,05	0,04
<b>Итого:</b>	<b>1</b>	-	-	<b>4,78</b>	<b>3,74</b>

Как показал анализ, использование твердотельного тканеэквивалентного фантома наиболее конкурентоспособно, поскольку является наиболее удобным и простым в эксплуатации.

### 3.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

SWOT-анализ заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

В таблице 10 представлен SWOT-анализ в виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 10 – SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– С1. возможность применения в ортовольтном рентгеновском диапазоне энергий;</li> <li>–С2. простота и удобство эксплуатации;</li> <li>–С3. Относительно невысокая стоимость.</li> <li>–С4. Расширение границ применимости</li> </ul>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Сл1. необходимость специальных форм для размещения камеры;</li> <li>– Сл2. Сложность расчетов из-за наличия потребности в использовании дополнительных формул и коэффициентов пересчета;</li> <li>–Сл3.отсутствие достоверной информации в ряде энергетических областей.</li> </ul>
<p><b>Возможности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– В1. повышение интереса к разработке за счет возможности создания гетерогенного поглотителя;</li> <li>– В2. развитие радиационной медицины приведет к расширению данного рынка, что повысит интерес к данной методике.</li> <li>– В3 Уменьшение затрат для проведения экспериментов.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. За счет удобства использования и простоты создания гетерогенного поглотителя открываются возможности выхода на новые рынки.</li> <li>2. Создание аналогичных методик для дальнейшего использования фантома.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Снижение количества расчетов путем сведения всех данных к удобному формату (таблицы, графики зависимости и пр.);</li> <li>2. Проведение дополнительных исследований различных энергетических областей, с целью снижения неопределенности.</li> </ol>
<p><b>Угрозы:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– У1. отсутствие коммерческого интереса к проекту;</li> <li>–У2. не востребованность на рынке, в силу излишней консервативности потенциальных клиентов;</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.Повышение конкурентоспособности за счет политики низких цен на рынке;</li> <li>2.Использование совокупности удобства использования и невысокой цены приведут к повышению</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Дополнительное исследование энергетических областей приведет к повышению спроса на товар, даже со стороны приверженцев консервативных взглядов.</li> <li>2. Написание статей и</li> </ol>

<p>–У3. высокая конкуренция на рынке, в виде сильного конкурента – водного фантома.</p>	<p>конкурентоспособности на рынке данных товаров. 3. Снижение расходов на экспериментальные материалы за счет расширения границ применимости</p>	<p>выступление на конференции для привлечения заинтересованных сторон и увеличение информированности о данном методе.</p>
---	--	---

На основе результатов проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей.

### 3.4 Планирование ВКР

Выпускная квалификационная работа (ВКР) – это работа научного характера, связанная с научным поиском, проведением исследований с целью получения научных обобщений, изыскания принципов и путей создания (модернизации) продукции, она включает в себя:

1. фундаментальные исследования, выполняемые с целью расширения научных знаний, явлений и закономерностей их развития безотносительно к их конкретному практическому применению;
2. поисковые исследования, выполняемые с целью нахождения путей использования выявленных явлений и закономерностей в конкретной области науки и техники для создания принципиально новых изделий, материалов и технологий;
3. прикладные исследования, направленные на решение научных проблем, совершенствование методов с целью получения конкретных результатов, используемых в опытно-конструкторских разработках при создании научно-технической.

### 3.4.1 Структура работ в рамках ВКР

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблица 11.

Таблица 11 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работ	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследования	2	Выбор направления исследования	Руководитель
	3	Календарное планирование	Руководитель Студент
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Обзор литературных источников и технической литературы	Студент
	5	Экспериментальные измерения и обработка полученных данных	Консультант Студент
	6	Построение модели гамма-терапевтического аппарата TeratronEquinox 100 и модели рентгеновского аппарата Xstrahl 300	Студент

Обобщение и оценка результатов	7	Обработка результатов. Сравнение результатов моделей и экспериментальных результатов.	Консультант Студент
	8	Определение целесообразности проведения НИР	Руководитель Студент
Оформление отчёта по ВКР	9	Составление пояснительной записки	Руководитель Студент
	10	Подготовка к защите	Руководитель Студент

### 3.4.2 Определение трудоемкости выполнения ВКР

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожi}$  используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (12)$$

где  $t_{ожi}$  – ожидаемая трудоёмкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{mini}$  – минимально возможная трудоёмкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{maxi}$  – максимально возможная трудоёмкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{ч_i}, \quad (13)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожci}$  – ожидаемая трудоёмкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел. [10].

В ходе данной работы количество человек, выполняющих каждую из работ на каждом из этапов, равняется одному.

### 3.4.3 Разработка графика проведения ВКР

В ходе данной работы был построен ленточный график проведения ВКР в форме диаграмм Ганта. Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k, \quad (14)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения одной работы, (кален.дн.);

$T_{pi}$  – продолжительность одной работы, (раб.дн.);

$k$  – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Расчёт коэффициента календарности производится по следующей формуле:

$$k = \frac{T_{кг}}{T_{кг} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (15)$$

где,  $T_{кг}$  – количество календарных дней в году ( $T_{кг} = 365$  дн.);

$T_{вд}$  – количество выходных дней в году ( $T_{вд} = 52$  дн.);

$T_{пд}$  – количество праздничных дней в году, ( $T_{пд} = 14$  дн.).

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  округлены до целого числа.

$$k = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22$$

Все рассчитанные значения сведены в таблицу 12.

Таблица 12 – Временные показатели проведения ВКР

№ работы	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ $T_{pi}$ , дн.	Длительность работ $T_{ki}$ , дн.
	$t_{min}$ , чел-дни	$t_{max}$ , чел-дни	$t_{ожі}$ , чел-дни			
1	1	5	2,6	Руководитель	2,6	3
2	3	5	3,8	Руководитель	3,8	5
3	3	5	3,8	Руководитель Студент	1,9 1,9	2 2
4	10	15	12	Студент	12	5
5	10	20	14	Консультант Студент	7 7	9 9
6	10	20	14	Студент	14	17
7	10	15	12	Консультант Студент	6 6	7 7
8	3	5	3,8	Руководитель Студент	1,9 1,9	2 2
9	10	20	14	Студент	14	17
10	3	5	3,8	Руководитель Студент	1,6 1,6	2 2
<b>Итого:</b>	<b>63</b>	<b>115</b>	<b>83,8</b>	-	<b>11,8/13/58,7</b>	<b>14/16/72</b>

На основе таблицы 12 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках ВКР на основе приложения В с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различными цветами в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

### 3.4.4 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по данной теме.

Для данной работы оборудование специально не покупалось, следовательно необходимо провести расчет амортизации использованного оборудования. Ежегодную сумму амортизационных отчислений рассчитывают следующим образом:

$$A = \frac{C_{перв} * N_a}{100}, \quad (16)$$

где  $A$  – ежегодная сумма амортизационных отчислений;

$C_{перв}$  – первоначальная стоимость объекта;

$N_a = \frac{100}{T_{сл}}$  – норма амортизационных отчислений, где  $T_{сл}$  – срок службы.

Все расчеты по приобретению оборудования, имеющегося в организации, но используемого для исполнения данных экспериментов, сводятся в таблицу 13.

Таблица 13 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.	Срок службы, лет	Сумма амортизации, за время проекта, тыс. руб.
1.	Гамма-терапевтический аппарат TheratronEquinox 100	1	43 000	10	700
2.	Рентгеновский аппарат Xstrahl 300	1	23 000	10	385
3.	Цилиндрическая ионизационная камера FC65-G	1	800	8	17

4.	Клинический дозиметр DOSE-1	1	900	6	25
5.	Анализатор дозового поля BluePhantom	1	6 000	10	100
6.	Твердотельный тканеэквивалентный фантом SP34	1	800	10	14
<b>Итого:</b>			<b>74 500</b>		<b>1 241</b>

### 3.4.5 Основная заработная плата исполнителей

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (17)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{осн}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} * T_p, \quad (18)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m * M}{F_d}, \quad (19)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 24 раб.дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб.дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

Баланс рабочего времени представлен в таблице 14.

Таблица 14 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Консультант	Студент
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней			
-выходные дни	52	52	52
-праздничные дни	14	14	14
Потери рабочего времени			
-отпуск	48	48	48
-невыходы по болезни	–	–	–
<b>Действительный годовой фонд рабочего времени</b>	<b>251</b>	<b>251</b>	<b>251</b>

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} * (1 + k_{пр} + k_d) * k_p, \quad (20)$$

где  $Z_{тс}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{тс}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчет основной заработной платы сводится в таблица 15.

Таблица15 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m, руб$	$Z_{дн}, руб.$	$T_p, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб.$
Руководитель	19500	0,3	0,3	1,3	40 560	1 680	11,8	19 830
Консультант	10 300	0,3	0,3	1,3	21 424	888	13	11 544
Студент	9893	0,3	0,3	1,3	20 578	410	58,7	24 067
<b>Итого:</b>								<b>55 441</b>

### 3.4.6 Дополнительная заработная плата

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} * Z_{\text{осн}}, \quad (21)$$

где  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты ( $k_{\text{доп}} = 0,1$ );

$Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

В таблице 16 приведен расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 16– Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Консультант	Студент
Основная зарплата, руб/мес.	19 830	11 544	24 067
Дополнительная зарплата, руб	1 983	1 154	2 407
<b>Итого:</b>	<b>21 813</b>	<b>12 698</b>	<b>26 474</b>

### 3.4.7 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} * (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (22)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в табличной форме (таблица 17).

Таблица 17– Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель	21 813	2 181
Консультант	11 544	1 154
Студент	24 067	2 407
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
<b>Итого: 16 526</b>		

### 3.4.8 Накладные расходы

Время, проведенное за работой примерно: 500 часов. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эл}} * F_{\text{об}} * P, \quad (23)$$

где  $C_{\text{эл}}$  – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;

$F_{\text{об}}$  – время использования оборудования, ч.

Рассчитанные затраты на электроэнергию приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Затраты на электроэнергию

Наименование	Время работы, ч	Мощность потребления электроэнергии, кВт	Цена за 1 кВт, руб.	Затраты на электроэнергию (З), руб.
1.Гамма-терапевтический аппарат TheratronEquinox 100	10	10	5,8	580
2.Рентгеновский аппарат	10	3,2		185,6

Xstrahl 300			
3. Цилиндрическая ионизационная камера FC65-G	20	0,004	0,46
4. Клинический дозиметр DOSE-1	20	0,004	0,46
5. ПЭВМ	480	0,5	1 392
<b>Итого:</b>			<b>2 159</b>

### **3.4.9 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта**

Расчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет бюджета затрат НТИ

<b>Наименование статьи</b>	<b>Сумма, руб.</b>
1. Затраты на спецоборудование	1 241 000
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	55 441
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	5 544
4. Отчисления во внебюджетные фонды	16 526
5. Накладные расходы	2 159
<b>Бюджет затрат НТИ</b>	<b>1 320 670</b>

### **3.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (24)$$

где  $I_{\text{фин}}^{\text{исп}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Тогда, рассчитывая значение интегрального финансового показателя учтем, что Исп.1 - использование только твердотельного фантома SP34, Исп. 2 - использование только водного фантома.

$$I_{\text{фин}}^{\text{Исп1}} = \frac{1\,320\,670 - 100\,000}{1\,320\,670} = 0,92$$

$$I_{\text{фин}}^{\text{Исп2}} = \frac{1\,320\,670 - 14\,000}{1\,320\,670} = 0,99$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum_{i=1}^n a_i * b_i, \quad (25)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы (таблица 20), где Исп.1 – использование твердотельного фантома SP34, Исп.2 – использование водного фантома.

Таблица 20– Оценка характеристик исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Оценка Исп. 1	Оценка Исп.2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	3
2. Удобство в эксплуатации	0,4	5	3
3. Помехоустойчивость	0,1	4	4
4. Энергосбережение	0,2	5	5
5. Надежность	0,1	4	4
6. Материалоемкость	0,1	5	4
<b>Итого:</b>	<b>1</b>	-	-

$$I_{p-Исп.1} = 5 * 0,1 + 5 * 0,4 + 4 * 0,1 + 5 * 0,2 + 4 * 0,1 + 5 * 0,1 = 4,8$$

$$I_{p-Исп.2} = 3 * 0,1 + 3 * 0,4 + 4 * 0,1 + 5 * 0,2 + 4 * 0,1 + 4 * 0,1 = 3,7$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{испi}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{испi} = \frac{I_{p-испi}}{I_{финр}}, \quad (26)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (таблица 21) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{ср}$ ):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}}, \quad (27)$$

Таблица 21 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Исп. 1	Исп. 2
1.	Интегральный финансовый показатель разработки	0,92	0,99

2.	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,8	3,7
3.	Интегральный показатель эффективности	5,2	3,7
4.	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,4	0,7

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Как видно из расчетов, использование твердотельного фантома SP34 является наиболее оптимальным и целесообразным.

#### **4. Социальная ответственность**

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [11].

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно [11], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего, в

определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

#### 4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. В таблице 22 приведены основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Таблица 22 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на персональном компьютере	–	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
	Шум, вибрация, электромагнитное	–	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы».
	–	Пожарная безопасность	ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
Работа с источниками ионизирующего излучения	Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне	–	СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.1192-03 Санитарно-

			эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований».
--	--	--	---

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

На инженера, работа которого связана с моделированием на компьютере и работой с источниками ионизирующего излучения, воздействуют следующие факторы:

1. физические:

- температура и влажность воздуха;
- шум;
- статическое электричество;
- электромагнитное поле низкой чистоты;
- освещённость;
- наличие излучения;

2. психофизиологические:

- физические перегрузки (статические, динамические);
- нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

#### **4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на ПК и с источниками ИИ**

#### 4.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальное удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

#### 4.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, показанного на рисунке 17.

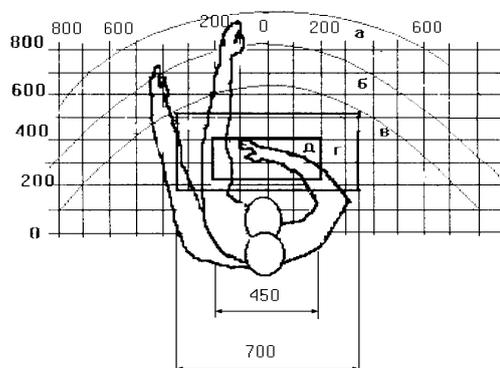


Рисунок 17– Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы [12]

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация – в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах от 680 до 800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420 – 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии от 500 до 600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии от 100 до 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 градусов. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

#### **4.2.3 Условия безопасной работы**

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии со [11] и приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	от 23 до 25	от 40 до 60	0,1
Тёплый	от 23 до 25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – от 20 до 25 °С, зимой – от 13 до 15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основным недостатком такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а

также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц – 25В/м;
- в диапазоне частот от 2 кГц до 400 кГц – 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц – 250нТл;
- в диапазоне частот от 2 кГц до 400 кГц – 25нТл.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Однако последние достижения науки в области производства мониторов позволяют значительно снизить уровень излучения. Использование современных ЭЛТ-мониторов и ЖК-мониторов, соответствующих стандарту ТСО-2003, гарантирует минимальные значения напряженности электромагнитных полей вблизи экранов (менее 10 В/м в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц и менее 1 В/м в диапазоне частот 2 – 400 кГц). Используемый для моделирования на ПК ЖК-монитор LG также соответствует стандарту ТСО-2003.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной

освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

#### 4.2.4 Радиационная безопасность

Главная цель радиационной безопасности – охрана здоровья людей от вредного воздействия ионизирующего излучения путем соблюдения основных принципов и норм радиационной безопасности.

Главным документом по радиационной безопасности при организации работ с источниками ионизирующих излучений является «Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений».

Для обеспечения безопасности существуют допустимые уровни доз, которые может получить человек. Уровни разделяются в соответствии с категорией по нормам радиационной безопасности.

Персонал (группа А) – лица, работающие с техногенными источниками, ионизирующими излучением, или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б). Население – все лица, включая персонал вне работы. Основные пределы доз приведены в таблице 25 [13].

Таблица 25 – Пределы допустимых доз

Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год:		
в хрусталике	150мЗв	15мЗв
в коже	500мЗв	50мЗв
в кистях и стопах	500мЗв	50мЗв

Пределы доз и допустимые уровни для персонала группы Б равны 1/4 от группы А.

Значения проектной мощности эквивалентной дозы для стандартной продолжительности пребывания в помещениях и на территориях персонала и населения приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Мощность эквивалентной дозы используемой при проектировании защиты

Категория облучаемых лиц		Назначение помещения	Продолжительность облучения, ч/год	Проектируемая мощность дозы, мкЗв/ч
Персонал	Гр.А	Постоянное пребывание	700	6,0
		Временное пребывание	850	12
	Гр.Б	Помещение организации и территория СЗЗ, где находится персонал гр.Б	2000	1,2
Население		Любое другое помещение и территория	8800	0,06

Студент, во время выполнения работ с источниками ионизирующего излучения относится к персоналу группы Б.

#### **4.2.4.1 Работа с закрытыми источниками ионизирующего излучения.**

В данной работе проводились эксперименты с закрытым источником ИИ:  $^{60}\text{Co}$ . Данный источник помещен в герметичную капсулу, за счет чего данный источник можно считать закрытым.

Основные требования для обеспечения радиационной безопасности при работе с закрытыми источниками – это сооружение соответствующей защиты от излучения для снижения мощности дозы на рабочих местах и в соседних помещениях до допустимой мощности дозы (ДМД). В нерабочем положении закрытый источник излучения должен находиться в защитных устройствах, а

установка, генерирующие ионизирующее излучение, должны быть обесточены. Устройство, в которое помещен закрытый радионуклидный источник, должно быть устойчивым к механическим, химическим, температурным и другим воздействиям, иметь знак радиационной опасности. Не допускается использование закрытых радионуклидных источников в случае нарушения их герметичности, а также по истечении установленного срока эксплуатации.

Для извлечения закрытого радионуклидного источника из контейнера следует пользоваться дистанционным инструментом или специальными приспособлениями. При работе с закрытым радионуклидным источником, извлеченным из защитного контейнера, должны применяться защитные экраны и манипуляторы, а при работе с источником, создающим мощность эквивалентной дозы более 2 мЗв/ч на расстоянии 1 м – специальные защитные устройства с дистанционным управлением.

Мощность эквивалентной дозы излучения от переносных, передвижных, стационарных дефектоскопических, терапевтических аппаратов и других установок, действие которых основано на использовании закрытых радионуклидных источников, не должна превышать 20 мкЗв/ч на расстоянии 1 м от поверхности защитного блока с источником. Мощность эквивалентной дозы излучения от устройств, при работе которых возникает сопутствующее неиспользуемое рентгеновское излучение, не должна превышать 3,0 мкЗв/ч на расстоянии 0,1 м от любой внешней поверхности.

Рабочая часть стационарных аппаратов и установок с неограниченным по направлению пучком излучения должна размещаться в отдельном помещении (преимущественно в отдельном здании или отдельном крыле здания); материал и толщина стен, пола, потолка этого помещения при любых положениях источника и направлении пучка излучения должны обеспечивать ослабление ионизирующего излучения в смежных помещениях и на территории организации до допустимых значений. Пульт управления таким аппаратом (установкой) должен размещаться в отдельном от источника излучения помещении. Входная дверь в помещение, где находится аппарат, должна

блокироваться с механизмом перемещения источника излучения или с включением высокого (ускоряющего) напряжения так, чтобы исключить возможность случайного облучения персонала.

Помещения, где проводятся работы на стационарных установках с закрытыми радионуклидными источниками, должны быть оборудованы системами блокировки и сигнализации о положении источника (блока источников). Кроме того, должно быть предусмотрено устройство для принудительного дистанционного перемещения закрытого радионуклидного источника в положение хранения в случае отключения энергопитания установки или в случае любой другой нештатной ситуации.

При использовании приборов с закрытыми радионуклидными источниками и устройств, генерирующих ионизирующее излучение, вне помещений или в общих производственных помещениях, должен быть исключен доступ посторонних лиц к источникам излучения и обеспечена их сохранность. В целях обеспечения радиационной безопасности персонала и населения следует:

- направлять ионизирующее излучение в сторону земли или туда, где отсутствуют люди;
- удалять источники излучения от обслуживающего персонала и других лиц на возможно большее расстояние;
- ограничивать время пребывания людей вблизи источников излучения;
- вывешивать знак радиационной опасности и предупредительные плакаты, которые должны быть отчетливо видны с расстояния не менее 3 м [14].

До начала работы с источниками излучения персонал обязан провести проверку исправности оборудования. При обнаружении неисправности необходимо приостановить работу, провести ревизию и ремонт оборудования.

#### 4.2.4.2 Работа с источниками рентгеновского излучения

Помимо закрытого источника ИИ в данной работе использовался рентгеновский аппарат, с максимальным напряжением на трубке 300 кВ.

Безопасность работы в рентгеновском кабинете обеспечивается посредством:

- применения рентгеновской аппаратуры и оборудования, отвечающих требованиям технических и санитарно-гигиенических нормативов, создающих требуемую клиническую результативность при обеспечении требований радиационной безопасности;
- обоснованного набора помещений, их расположения и отделки;
- использования оптимальных физико-технических параметров работы рентгеновских аппаратов при рентгенологических исследованиях;
- применения стационарных, передвижных и индивидуальных средств радиационной защиты персонала, пациентов и населения;
- обучения персонала безопасным методам и приемам проведения рентгенологических исследований;
- соблюдения правил эксплуатации коммуникаций и оборудования;
- контроля за дозами облучения персонала и пациентов;
- осуществления производственного контроля за выполнением норм и правил по обеспечению безопасности при рентгенологических исследованиях и рентгенотерапии [15].

Радиационная безопасность персонала рентгеновского кабинета обеспечивается системой защитных мероприятий конструктивного характера при производстве рентгеновских аппаратов, планировочными решениями при

их эксплуатации, использованием стационарных, передвижных и индивидуальных средств радиационной защиты, выбором оптимальных условий проведения рентгенологических исследований, осуществлением радиационного контроля, выполнением требований настоящих правил.

К работе по эксплуатации рентгеновского аппарата допускаются лица не моложе 18 лет, имеющие документ о соответствующей подготовке, прошедшие инструктаж и проверку знаний правил по обеспечению безопасности, действующих в учреждении документов и инструкций.

Система инструктажа с проверкой знаний по технике безопасности и радиационной безопасности включает:

- вводный инструктаж – при поступлении на работу;
- первичный– на рабочем месте;
- повторный – не реже двух раз в году;
- внеплановый– при изменении характера работ (сменеоборудования рентгеновского кабинета, методики обследования или лечения ит.п.), после радиационной аварии, несчастного случая.

Лица, проходящие стажировку и специализацию в рентгеновском кабинете, а также учащиеся высших и средних специальных учебных заведений медицинского профиля допускаются к работе только после прохождения вводного и первичного инструктажа по технике безопасности и радиационной безопасности.

### **4.3 Электробезопасность**

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного

прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор работает с различными электроприборами. Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта оборудования;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей оборудования);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок: отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы; вывешивание плакатов, указывающих место работы; заземление корпусов всех установок через нулевой провод; покрытие металлических поверхностей инструментов надёжной изоляцией; недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, заклучение в корпус токоведущих частей).

#### **4.4 Пожарная безопасность**

Согласно [16], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с

твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины возгорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на:

- организационные;
- технические;
- эксплуатационные;
- режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному).
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел. 112.
3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## **Заключение**

В ходе выпускной квалификационной работы были проведены измерения поглощенной дозы в водном и твердотельном фантомах с различными размерами полей и при различных напряжениях рентгеновского аппарата Xstrahl 300. Далее было проведено моделирование эксперимента в программе «Компьютерная лаборатория» для водного и твердотельного фантомов с различными размерами полей и напряжениями на рентгеновской трубке. После чего рассчитали и сравнили поправочные коэффициенты пересчета для разных полей и напряжений трубки, полученные в результате моделирования и эксперимента данные.

## **Выводы**

1. Рассчитанные поправочные коэффициенты пересчета для различных размеров полей и напряжений, полученные двумя разными способами (на основании экспериментальных данных и полученных в результате моделирования) отличаются друг от друга меньше чем на 3 %.

2. Твердотельный тканеэквивалентный фантом SP34 можно применять в ортовольтном рентгеновском диапазоне энергий, совместно с рассчитанными поправочными коэффициентами пересчета.

3. Твердотельный фантом SP34 является пригодным для ежеквартальной проверки оборудования, для обеспечения гарантии качества соответствующего оборудования.

Результаты учебно-исследовательской работы за время обучения были представлены на следующих конференциях:

- VIII Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» май 2016 г. Томск. Доклад «Применение твердотельного фантома SP34 в среднеэнергетическом рентгеновском диапазоне».

- XIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «перспективы развития фундаментальных наук» апрель 2017 г. Томск. Доклад «Исследование применимости твердотельного фантома SP34 для ортовольтного рентгеновского излучения».

### Список используемой литературы

1. МАГТЭ Определение поглощенной дозы при дистанционной лучевой терапии: международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде // Серия технических докладов №398. – Вена, 2004
2. User's Guide - FC65-G Ionization Chamber. – Schwazenbruck, Germany: IBA Dosimetry GmbH, 2013.
3. User's Guide - Xstrahl 300 – Atlanta, GA, USA: Gulmay Medical Inc., 2014.
4. Руководство по эксплуатации: «Клинический дозиметр Dose 1, S/N 13106». – Томск: Формуляр, 2014. - 3 с.
5. Руководство пользователя на анализатор дозного поля BluePhantom. - Шварценбрук, Германия : IBA DosimetryGmbHBahnhofstrasse , 2010. - С. 194.
6. Технический паспорт Анализатор дозного поля BluePhantom с принадлежностями. - 94 4450 изд. - С. 11.
7. User's Guide - SP34 QA Phantome. - Schwazenbruck: IBA Dosimetry GmbH, 2011.
8. Полимерные материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.polymerbranch.com/>
9. Беспалов В.И. «Компьютерная лаборатория» (КЛ PCLab) Описание программы. Руководство по работе с программой // Изв. вузов Физика, С. 109–126.– 2016.

10. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
11. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.
12. ГОСТ 12.0.002-80. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.
13. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. - М.: Энергоатомиздат, 1995-496 с.
14. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) - М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. - 83 с.
15. СанПиН 2.6.1.1192-03 «Гигиенические требования кустройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований». // [www.rospotrebnadzor.ru](http://www.rospotrebnadzor.ru).
16. НПБ 105-95. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. 31 окт. 1995 г.

## Приложение А

Таблица А.1 – Результаты измерений в водном фантоме

Напряжение, кВ	Значение заряда, нКл					
	Размеры полей, см <sup>2</sup>					
	4x4	6x6	8x8	10x10	15x15	20x20
100	-16,46	-18,66	-18,43	-19,57	-21,27	-21,93
	-16,49	-18,68	-18,44	-19,55	-21,26	-21,95
	-16,46	-18,66	-18,44	-19,56	-21,27	-21,95
120	-16,24	-18,5	-18,99	-20,17	-22,29	-23,14
	-16,51	-18,61	-19	-20,17	-22,23	-23,17
	-16,22	-18,61	-19	-20,17	-22,25	-23,14
150	-16,13	-18,37	-19,08	-20,4	-22,58	-23,64
	-16,12	-18,41	-19,09	-20,42	-22,56	-23,64
	-16,12	-18,41	-19,08	-20,3	-22,57	-24,64
180	-16,16	-18,21	-19,36	-20,71	-23,06	-24,28
	-16,14	-18,26	-19,32	-20,7	-23,06	-24,34
	-16,15	-18,26	-19,35	-20,72	-23,06	-24,28
200	-16,01	-18,93	-19,3	-20,89	-23,43	-24,74
	-16,01	-18,9	-19,29	-20,85	-23,42	-24,78
	-16,02	-18,9	-19,31	-20,93	-23,43	-24,75
250	-16,25	-18,94	-19,54	-21,05	-23,67	-25,15
	-16,21	-18,95	-19,57	-21,09	-23,67	-25,18
	-16,24	-18,95	-19,56	-21,07	-23,66	-25,15
300	-16,42	-18,93	-19,39	-20,91	-23,34	-24,8
	-16,42	-18,98	-19,39	-20,9	-23,38	-24,85
	-16,4	-18,98	-18,4	-20,91	-23,36	-24,83

Таблица А.2 – Усредненные значения заряда, полученные в результате эксперимента  
с водным фантомом

Напряжение, кВ	Значение заряда, нКл					
	Размеры полей, см <sup>2</sup>					
	4x4	6x6	8x8	10x10	15x15	20x20
100	-16,47	-18,67	-18,44	-19,56	-21,27	-21,94
120	-16,32	-18,57	-19,00	-20,17	-22,26	-23,15
150	-16,12	-18,40	-19,08	-20,37	-22,57	-23,97
180	-16,15	-18,24	-19,34	-20,71	-23,06	-24,30
200	-16,01	-18,91	-19,30	-20,89	-23,43	-24,76
250	-16,23	-18,95	-19,56	-21,07	-23,67	-25,16
300	-16,41	-18,96	-19,06	-20,91	-23,36	-24,83

## Приложение Б

Таблица Б.1–Результаты измерений в твердотельном фантоме SP34

Напряжение, кВ	Значение заряда, нКл					
	Размеры полей, см <sup>2</sup>					
	4x4	6x6	8x8	10x10	15x15	20x20
100	-13,7	-16,84	-18,59	-19,74	-21,27	-21,92
	-13,71	-16,88	-18,58	-19,68	-21,22	-21,94
	-13,7	-16,86	-18,54	-19,7	-21,25	-21,95
120	-13,51	-16,62	-18,42	-19,63	-21,4	-22,19
	-13,5	-16,63	-18,53	-19,62	-21,46	-22,21
	-13,49	-16,65	-18,44	-19,62	-21,47	-22,21
150	-13,48	-16,47	-18,34	-19,56	-21,37	-22,32
	-13,5	-16,49	-18,35	-19,57	-21,38	-22,33
	-13,47	-16,49	-18,35	-19,57	-21,37	-22,31
180	-13,58	-16,42	-18,37	-19,68	-21,56	-22,55
	-13,56	-16,46	-18,43	-19,68	-21,55	-22,45
	-13,57	-16,45	-18,39	-19,67	-21,53	-22,5
200	-13,49	-16,32	-18,21	-19,49	-21,48	-22,47
	-13,51	-16,29	-18,19	-19,52	-21,44	-22,46
	-13,52	-16,3	-18,15	-19,5	-21,46	-22,47
250	-13,81	-16,48	-18,43	-19,62	-21,71	-22,67
	-13,83	-16,47	-18,41	-19,6	-21,5	-22,66
	-13,81	-16,46	-18,38	-19,62	-21,52	-22,65
300	-14,05	-16,53	-18,31	-19,59	-21,51	-22,34
	-14,05	-16,58	-18,34	-19,55	-21,36	-22,35
	-14,01	-16,54	-18,35	-19,58	-21,35	-22,32

Таблица Б.2–Усредненные значения заряда, полученные в результате эксперимента с  
твердотельным фантомом SP34

Напряжение, кВ	Значение заряда, нКл					
	Размеры полей, см <sup>2</sup>					
	4x4	6x6	8x8	10x10	15x15	20x20
100	-13,70	-16,86	-18,57	-19,71	-21,25	-21,94
120	-13,50	-16,63	-18,46	-19,62	-21,44	-22,20
150	-13,48	-16,48	-18,35	-19,57	-21,37	-22,32
180	-13,57	-16,44	-18,40	-19,68	-21,55	-22,50
200	-13,51	-16,30	-18,18	-19,50	-21,46	-22,47
250	-13,82	-16,47	-18,41	-19,61	-21,58	-22,66
300	-14,04	-16,55	-18,33	-19,57	-21,41	-22,34

## Приложение В

Таблица В.1–Календарный график-план НИОКР

№ Работы	Исполнитель	Т <sub>кп</sub> , дн.	Продолжительность выполнения работы													
			февраль			март			апрель			май			июнь	
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Руководитель	3														
2	Руководитель	5														
3	Руководитель	2														
	Студент	2														
4	Студент	15														
5	Консультант	9														
	Студент	9														
6	Студент	17														
7	Консультант	7														
	Студент	7														
8	Руководитель	2														
	Студент	2														
9	Студент	17														
10	Руководитель	2														
	Студент	2														

где  – Руководитель,  – Студент,  – Консультант.